

А. Н. Новожилов, А. М. Акаев,
Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова
(г. Павлодар, Казахстан)

В. Н. Горюнов, Т. А. Новожилов
ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет»
(г. Омск, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВ В СИНХРОННОМ КОМПЕНСАТОРЕ ПРИ ВИТКОВОМ ЗАМЫКАНИИ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

Синхронные компенсаторы (СК) используются в электроэнергетических системах для компенсации реактивной мощности и поддержания нормального уровня напряжения в районах сосредоточения потребительских нагрузок. Одним из самых распространенных видов короткого замыкания в обмотке статора является витковое замыкание (ВЗ). Моделировать токи ВЗ в обмотках СК в стационарных режимах работы можно по-разному [1 - 6]. Однако большая часть известных методов сложна и реализуется только при наличии геометрических размеров элементов СК. Часто эти размеры получить сложно, а порой просто невозможно. Кроме того, определение индуктивностей сопровождается громоздкими вычислениями. Этого можно избежать, если моделирование токов в обмотках осуществлять следующим образом.

Схема СК приведена на рисунке 1. С учетом этой схемы и [7 - 9] токи I_A , I_B , I_C в обмотках фаз А, В, С и I_{Ak} в замкнувшихся витках статора в стационарном режиме, который задается током I_f в обмотке возбуждения, можно определить из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - I_f X_{Af} &= \dot{I}_A (R_A + jX_A) + \dot{I}_B X_{AB} + \dot{I}_C X_{AC} + \dot{I}_{Ak} X_{A,Ak}; \\ \dot{U}_B - I_f X_{Bf} &= \dot{I}_A X_{BA} + \dot{I}_B (R_B + jX_B) + \dot{I}_C X_{BC} + \dot{I}_{Ak} X_{B,Ak}; \\ \dot{U}_C - I_f X_{Cf} &= \dot{I}_A X_{CA} + \dot{I}_B X_{CB} + \dot{I}_C (R_C + jX_C) + \dot{I}_{Ak} X_{C,Ak}; \\ -I_r X_{Ak,f} &= \dot{I}_A X_{Ak,A} + \dot{I}_B X_{Ak,B} + \dot{I}_{Ak,C} X_C + \dot{I}_{Ak} (R_{Ak} + R_\theta + jX_{Ak}), \end{aligned} \right\} (1)$$

где U_A , U_B и U_C – напряжения фаз А, В, и С; $R_A(jX_A)$, $R_B(jX_B)$, $R_C(jX_C)$ и $R_{Ak}(jX_{Ak})$ – активные (реактивные) сопротивления фаз и замкнувшихся витков; R_θ – сопротивление дуги, при моделировании принимается равным 0,13 Ом, то есть замеренному переходному сопротивлению контактов коммутирующего устройства и соединительных проводов.

Для формирования системы уравнений математической модели СК необходимо знать параметры схемы СК. В данной работе они определяются экспериментально.

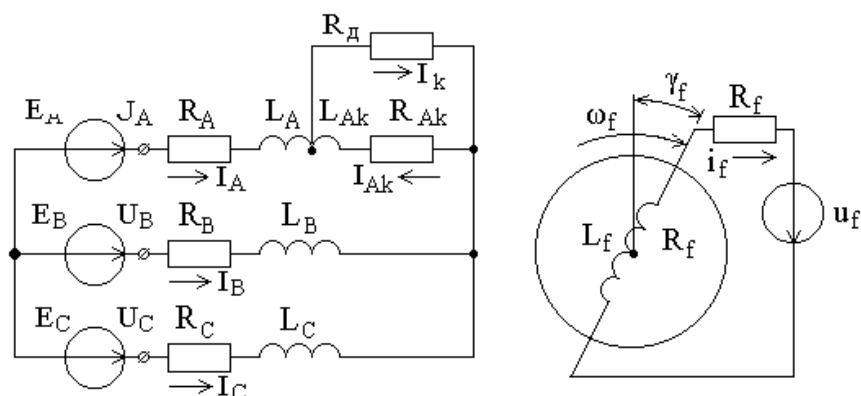


Рис. 1. Схема распределения токов в обмотках синхронного компенсатора

Активное сопротивление фазы статора R_1 с достаточной точностью можно получить путем замера ее мостом постоянного тока.

Среднее значение главного индуктивного сопротивления фазы СК определяется из первого уравнения системы (1) при $\omega_k = 0$, если в него подставить действительное значение напряжения фазы U_A в сети при токе возбуждения $I_f = 0$. В этом случае

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A (R_A + 1,5jX_A), \text{ а } X_{m0} = \sqrt{(U_1 / I_1)^2 - R_1^2} / 1,5, \quad (2)$$

где U_1 и I_1 – действительные значения напряжения и тока фазы СК.

Взаимное индуктивное сопротивление фазы статора и обмотки ротора также можно определить также из первого уравнения системы (1), если в нем принять ток возбуждения I_f таким, при котором токи фаз СК будут равны нулю. В результате

$$\dot{U}_A - I_f X_{Af} = 0, \text{ а } X_{m0f} = U_1 / I_f. \quad (3)$$

Экспериментальные значения токов I_1 и I_f лабораторного СК при напряжении фазы $U_1 = 224\text{В}$, необходимые для определения X_{m0} и X_{m0f} , приведены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные для определения X_{m0} и X_{m0f}

Токи в обмотках	Величины токов в обмотках СК, А		
Ток в обмотка статора $I_1, \text{А}$	2,1	1,2	0,0
Ток в обмотке ротора $I_f, \text{А}$	0,0	1,5	3,1

Результаты эксперимента (числитель) и расчета (знаменатель) токов в обмотках фаз статора и в замкнутых витках СК при токе возбуждения $I_f = 1,5\text{A}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета и измерения токов в обмотках СК

Режим работы СК	Токи в обмотках статора			
	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_{Ak}, A
Нормальный режим	$\frac{1,050}{1,083}$	$\frac{1,000}{1,083}$	$\frac{1,200}{1,083}$	$\frac{1,050}{1,083}$
Витковое замыкание в фазе А	$\frac{1,000}{1,189}$	$\frac{1,100}{0,935}$	$\frac{1,250}{1,242}$	$\frac{17,000}{16,437}$

Как показали многочисленные эксперименты, некоторое расхождение между результатами расчета и эксперимента неповрежденного СК вызвано неточностью при монтаже ротора в статоре, что повлекло их несоосность и неравенство индуктивных сопротивлений фаз. В свою очередь сопоставление результатов моделирования и эксперимента показали, что такая математическая модель позволяет с точностью до 5 - 10% получать токи в обмотках статора и ротора в любом эксплуатационном режиме. Этого вполне достаточно, например, для разработки и отстройки релейной защиты СК от повреждений в обмотках статора и ротора.

Список использованных источников

1. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 909 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат. - 1984. - 240 с.
4. Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М. Основы проектирования машин переменного тока. - Л.: Энергия, 1974. - 504 с.
5. Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. К. и др. Проектирование электрических машин. - М.: Энергия, 1980. 495 с.
6. Абрамов А. И., Иванов-Смоленский А. В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. - М.: Высшая школа, 2001.
7. Новожилов А. Н. Математическое моделирование эксплуатационных и аварийных режимов работы асинхронных двигателей // Электричество. 2000. № 5. С.37 - 41.
8. Новожилов А. Н., Андреева О. А., Воликова М. П., Гаспарян А. Г., Новожилов Т. А. Метод формирования системы уравнений математической модели электрических машин и трансформаторов в эксплуатационных режимах // Омский научный вестник 2006. №9 (46). Дек. С. 108 - 112.
9. Новожилов А. Н., Акаев А. М., Новожилов Т. А., Волгина Е. М. Простая математическая модель для определения токов в обмотках синхронного компенсатора в рабочем режиме // Вестник ПГУ (энергетическая серия). 2014. № 3. С. 233 - 235.